

黄土丘陵区不同植被根际土壤微量元素含量特征*

张超^{1,2,3} 刘国彬² 薛 蕙^{1,2,*} 张昌胜¹

(¹西北农林科技大学水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西杨凌 712100; ²中国科学院/水利部水土保持研究所, 陕西杨凌 712100; ³中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要 为了解黄土高原不同植被土壤微量元素的根际效应, 分析了该地区柠条、沙棘、沙打旺、柳枝稷、阿尔泰狗娃花和茵陈蒿 6 种植被根际与非根际土壤中有有机碳、全氮、Mn、Cu、Fe、Zn 含量。结果表明: 6 种植被中 柠条、阿尔泰狗娃花和茵陈蒿根际土壤的有机碳、全氮含量高于非根际土壤; 除柠条和沙棘外, 其余 4 种植被非根际土壤 pH 值均显著高于根际土壤。6 种植被根际土壤有效 Mn 含量均低于非根际; 柠条、沙打旺和柳枝稷根际有效 Cu 含量显著高于非根际, 表现出强烈根际富集现象。除沙打旺外, 其他 5 种植被根际有效 Fe 含量均略高于非根际。沙打旺、柳枝稷、茵陈蒿和阿尔泰狗娃花表现出强烈的有效 Zn 根际富集现象。根际与非根际土壤有机碳、全氮与有效 Mn、有效 Zn, 以及有效 Mn 与有效 Zn 呈极显著正相关。根际土壤 pH 值与有效 Mn 和有效 Zn 呈显著负相关。由于不同植物根系的生长特征、根际 pH 值及微生物种类等的差异, 不同植被根际的微量元素含量不同, 茵陈蒿根际 4 种微量元素含量高于其他植被。

关键词 根际土壤 非根际土壤 微量元素 植被 黄土丘陵区

文章编号 1001-9332(2012)03-0645-06 中图分类号 S154.36 文献标识码 A

Characteristics of soil microelements contents in the rhizospheres of different vegetation in hilly-gully region of Loess Plateau. ZHANG Chao^{1,2,3}, LIU Guo-bin², XUE Sha^{1,2}, ZHANG Chang-sheng¹ (¹State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A & F University, Yangling 712100, Shaanxi, China; ²Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences/Ministry of Water Resources, Yangling 712100, Shaanxi, China; ³Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China). -Chin. J. Appl. Ecol. 2012 23(3): 645-650.

Abstract: To explore the rhizosphere effect of the microelements in the soils under different vegetation types in Loess Plateau, this paper analyzed the organic C, total N, Mn, Cu, Fe, and Zn contents in the rhizosphere soil and bulk soil of six vegetation types in hilly-gully region of Loess Plateau. Among the six vegetation types, *Caragana korshinskii*, *Heteropappus altaicus*, and *Artemisia capillaries* had higher organic C and total N contents in rhizosphere soil than in bulk soil. With the exception of *C. korshinskii* and *H. rhamnoides*, all the six vegetation types had a significantly lower pH in rhizosphere soil than in bulk soil. The six vegetation types had a lower available Mn content in rhizosphere soil than in bulk soil, and the *C. korshinskii*, *Astragalus adsurgens*, and *Panicum virgatum* had a significantly higher available Cu content in rhizosphere soil than in bulk soil. The six vegetation types except *A. adsurgens* had a slightly higher available Fe content in rhizosphere soil than in bulk soil, and *A. adsurgens*, *P. virgatum*, *H. altaicus*, and *A. capillaries* had a significant accumulation of available Zn in rhizosphere soil. There existed significant positive correlations between the rhizosphere soil and bulk soil of the six vegetation types in the relationships between the organic C and total N contents and the available Mn and Zn contents and between the contents of available Mn and Zn. In rhizosphere soil, available Mn and Zn contents were significantly negative-

* 中国科学院战略科技先导项目(XDA05060300)和陕西省科技基础性研究项目(2011JQ5007)资助。

** 通讯作者。E-mail: xuasha100@163.com

2011-07-24 收稿 2011-12-13 接受。

ly correlated with pH value. Due to the differences in root growth characteristics, rhizosphere pH value, and microbial structure composition, the microelements contents in the rhizosphere soil of the six vegetation types differed, with the contents of Mn, Cu, Fe, and Zn being higher in the rhizosphere soil of *H. altaicus* than in that of the other vegetation types.

Key words: rhizosphere; bulk soil; microelement; vegetation; hilly-gully region of Loess Plateau.

土壤中的微量元素是酶活性、维生素和生长激素等的重要组成成分,任何一种微量元素过量或缺乏都会影响植物的正常生长^[1]。根际是植物生长过程中形成的复杂的、动态的微型生态系统,对植物的生长发育起着至关重要的作用。近年来,国内外学者对根际土壤微量元素含量进行了大量研究。Lehto 等^[2]利用 DGT 模型研究了植物根系吸收微量元素的机理;Kopittke 等^[3]分析了根际土壤 pH 值与 Mn 含量的关系;任伟等^[4]探讨了阿拉善干旱荒漠区霸王(*Zygophyllum xanthoxylum*)、白刺(*Nitraria tangutorum*)等 7 种旱生灌木根际与非根际土壤 Ca、Mg、Fe、Mn、Zn、Cu 的含量,结果表明 7 种灌木根际有效铁、有效锰、有效锌含量均大于非根际,表现出明显的富集效应;张文元等^[5]研究发现,与非根际相比,毛竹(*Phyllostachys edulis*)根际土壤对微量元素的溶解吸收受根际环境的影响更显著。

黄土高原丘陵区环境恶劣,加之长期的人为活动干扰,自然植被遭到破坏,土壤结构疏松,水土流失较为严重。近年来开展的生态建设和退耕还林(还草)工程明显改善了该区的土壤状况。目前对黄土丘陵区土壤的研究大多集中在土壤物理结构^[6]、养分状况^[7-9]以及微生物特性^[10-14]等方面,而对土壤中物质交换频繁、生化反应最为强烈的区域——根际的研究相对较少。因此,分析黄土丘陵区不同植被根际养分及微量元素含量特征,对研究该地区植被演替与重建、植物的耐旱机制、植物根际的生理生化反应过程及抗逆性等方面起着重要的作用。为此,本文以黄土丘陵区 6 种主要植被为对象,分析其根际、非根际土壤微量元素含量的变化,及其与有机质、全氮和 pH 值的关系,以为该流域植被恢复及土壤肥力特征描述提供数据支持,为合理利用土地资源和制订切实可行的水土保持措施提供科学依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于中国科学院安塞水土保持实验站的墩山(36°51'30" N, 109°19'23" E),海拔 1330 m。该

区域属黄土高原丘陵沟壑地貌,为典型的侵蚀环境,年均降雨量为 510 mm,降雨年际变化大,且年内分配不均,大多降雨集中于 7—9 月;土壤为黄土母质上发育的黄绵土,土壤抗冲、抗蚀能力差,水土流失严重;土壤质地类型为粉砂壤土,砂粒含量占 19.0%,粉粒含量占 65.2%,黏粒含量占 15.8%。流域植被属于暖温带落叶阔叶林区向暖温带草原区过渡的森林草原植被。自 1999 年实施退耕还林工程以来,该流域生态环境明显改善。

1.2 样地选择及采样

2008 年 9 月,根据流域地貌特征、植被以及土地利用状况,在流域内选择种植前均为坡耕地,坡度、坡向相似,具有代表性的 8 年生的 6 种植被:人工灌木林包括柠条(*Caragana korshinskii*)林、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)林;人工草地包括沙打旺(*Astragalus adsurgens*)、柳枝稷(*Panicum virgatum*);天然草地包括阿尔泰狗娃花(*Heteropappus altaicus*)、茵陈蒿(*Artemisia capillaris*)。其基本特征及林下植被如表 1。

在各样地选取 3 个 20 m × 20 m 小区,每个小区内按“S”形选取 6 个点,挖取有完整根系的土体,将根表面附着的土壤全部抖落,然后迅速装入塑料袋内作为根际土。同时采集距离根系约 15 cm 的土壤,为非根际土^[15]。所有土样带回室内充分混匀,风干后测定土壤有机质、全氮、pH 值及各种微量元素有效态含量。土壤有机碳采用重铬酸钾氧化外加加热法测定;全氮采用半微量凯氏法测定;pH 值用 pH 计测定(水:土 = 2.5:1);土壤微量元素测定采用 DTPA 浸提通过 2 mm 尼龙筛的根际和非根际土壤的风干土样,在室温下振荡 1.5 h,过滤后,用原子吸收分光光度计(GBC932AA)在波长 324.8、248.3、213.9 和 279.5 nm 下,分别测定土壤有效铜、有效铁、有效锌和有效锰的吸光度^[16]。

1.3 数据处理

采用 SPSS 15.0 统计软件的方差分析、多重比较(Duncan 法, $\alpha = 0.05$)和相关性分析(Pearson 法)对数据进行处理。

表 1 样地基本特征

Table 1 Description of sampling plots

优势种 Dominant species	坡向 Slope aspect	坡度 Slope degree (°)	海拔 Altitude (m)	盖度 Coverage (%)	土壤质地 Soil texture (%)			其他种 Other species
					沙粒 Sand	粉粒 Silt	黏粒 Clay	
柠条 <i>C. korshinskii</i>	N	20	1257	72.5	32.1	55.7	12.2	铁杆蒿 <i>Artemisia sacrorum</i>
沙棘 <i>H. rhamnoides</i>	N	22	1220	60.6	27.4	58.6	14.0	艾蒿、长芒草 <i>Artemisia argyi, Stipa bungeana</i>
沙打旺 <i>A. adsurgens</i>	NE10°	20	1235	68.5	32.8	53.8	13.4	兴安胡枝子、苦苣菜 <i>Lespedeza davurica, Lactuca indic</i>
柳枝稷 <i>P. virgatum</i>	NW25°	24	1282	75.2	32.9	53.9	13.2	早熟禾、阿尔泰狗娃花 <i>Poa annua, Heteropappus altaicus</i>
阿尔泰狗娃花 <i>H. altaicus</i>	NW10°	24	1311	70.5	30.8	54.0	15.2	长芒草、铁杆蒿 <i>S. bungeana, A. sacrorum</i>
茵陈蒿 <i>A. capillaris</i>	N	27	1298	64.5	31.0	55.2	13.8	兴安胡枝子、二裂委陵菜 <i>L. Davurica, Potentilla bifurca</i>

2 结果与分析

2.1 不同植被根际与非根际土壤有机碳和全氮含量

由图 1 可以看出 柠条、阿尔泰狗娃花和茵陈蒿的根际土壤有机碳含量高于非根际,沙棘和柳枝稷为非根际高于根际,而沙打旺则两者间无显著差异.其中,根际土壤有机碳含量为阿尔泰狗娃花和茵陈蒿最高,分别为4.9和4.7 g · kg⁻¹,柠条和沙棘最

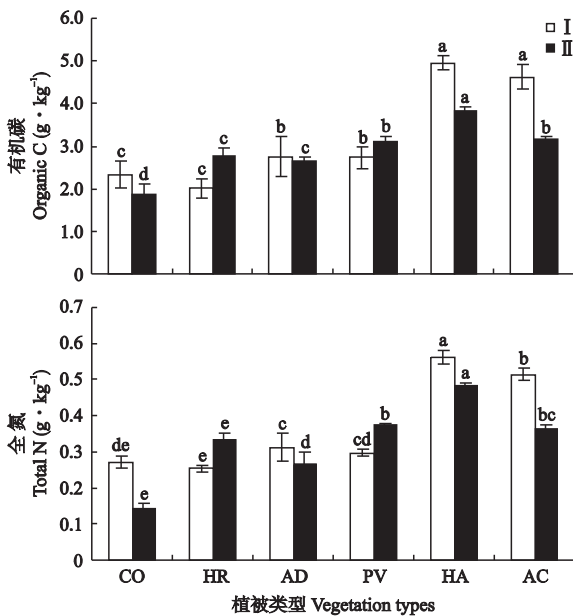


图 1 不同植被根际与非根际土壤有机碳、全氮含量

Fig.1 Organic C and total N in the rhizosphere soil of different vegetations (means ± SD) .

CO: 柠条 *Caragana korshinskii*; HR: 沙棘 *Hippophaer rhamnoides*; AD: 沙打旺 *Hippophae rhamnoides*; PV: 柳枝稷 *Panicum virgatum*; HA: 阿尔泰狗娃花 *Heteropappus altaicus*; AC: 茵陈蒿 *Artemisia capillaris*. I: 根际土壤 Rhizosphere soil; II: 非根际土壤 Bulk soil. 不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$) Different letters represented statistic significance at 0.05 level. 下同 The same below.

低;非根际为阿尔泰狗娃花最高,柠条最低.根际土壤全氮含量除沙棘和柳枝稷根际含量小于非根际外,其他4种植物均大于非根际.

2.2 不同植被根际与非根际土壤 pH 值

除柠条和沙棘外,其余4种植物非根际土壤都呈现不同程度的酸化(图2).根际土壤 pH 值在 8.50 ~ 8.70 之间变化,柠条和沙打旺最高,而阿尔泰狗娃花最低;非根际为茵陈蒿和柳枝稷最高,沙棘和阿尔泰狗娃花最低.

2.3 不同植被根际与非根际土壤有效 Mn、Cu、Fe 和 Zn 含量

不同植被根际土壤有效 Mn、Cu、Fe 和 Zn 含量差异较大(图3).6种植物根际土壤有效 Mn 含量均低于非根际,且无论是根际还是非根际,茵陈蒿和阿尔泰娃花土壤 Mn 含量均显著高于其他植被.柠条、沙打旺和柳枝稷根际土壤有效 Cu 含量显著高于非根际,表现出强烈的根际富集现象,而沙棘和茵陈蒿根际、非根际无明显差异.除沙打旺外,其他5种植

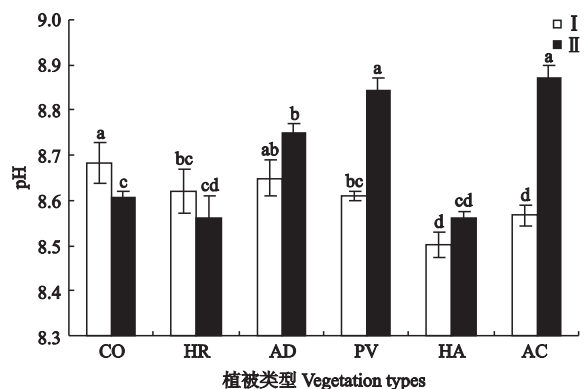


图 2 不同植被根际与非根际土壤 pH 值

Fig.2 pH in the rhizosphere and bulk soil of different vegetations (mean ± SD) .

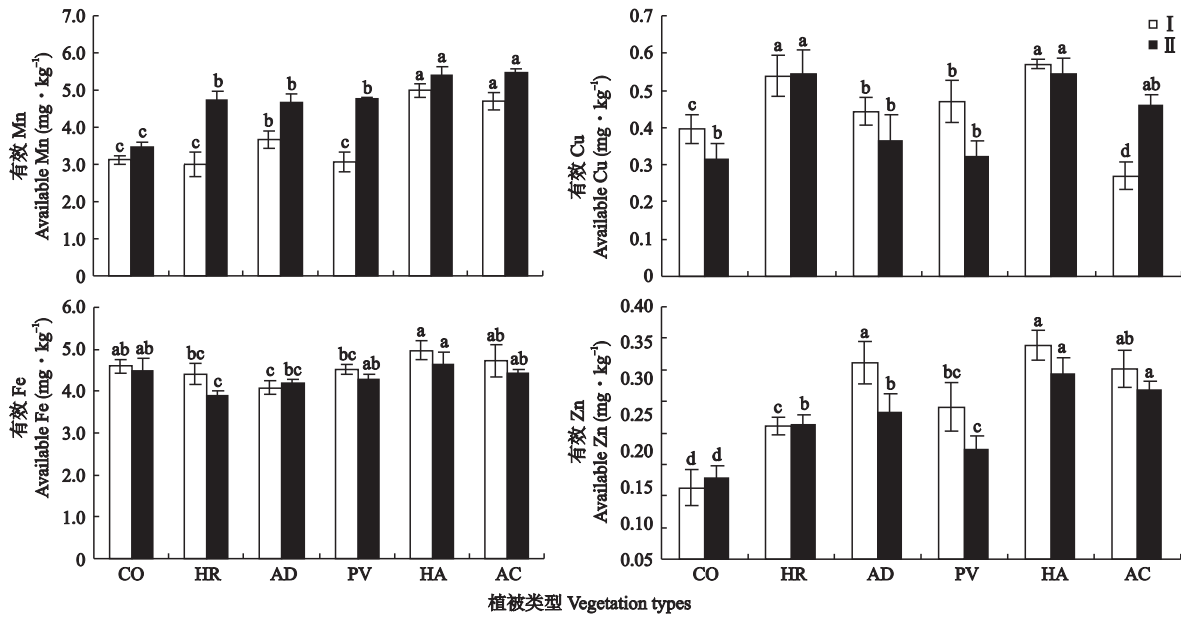


图3 不同植被根际与非根际土壤中 Mn、Cu、Fe 和 Zn 含量

Fig.3 Content of available Mn, Cu, Fe and Zn in the rhizosphere and bulk soil of different vegetations (mean ± SD).

被根际土壤的有效 Fe 含量高于非根际,但是差异并不明显.除柠条和沙棘外,沙打旺、柳枝稷、茵陈蒿和阿尔泰狗娃花根际的土壤有效 Zn 均表现出强烈的根际富集现象,为沙打旺、茵陈蒿 > 阿尔泰狗娃花 > 柳枝稷 > 沙棘 > 柠条;非根际则为茵陈蒿、阿尔泰狗娃花 > 沙棘、沙打旺 > 柳枝稷 > 柠条.

由表 2 可以看出,无论是根际还是非根际,土壤

有机碳和全氮之间均呈极显著正相关,且二者与有效 Mn 和有效 Zn 极显著正相关,有效 Mn 与有效 Zn 极显著正相关.根际土壤 pH 值与有机碳、全氮、有效 Mn、有效 Zn 呈显著负相关,但非根际并不显著.此外,根际土壤有效 Mn 与有效 Fe 显著正相关 ($P < 0.05$) 与有效 Cu 相关不显著;而非根际土壤为有效 Mn 与有效 Cu 显著正相关,与有效 Fe 相关不显著.

表 2 不同植被根际 (A) 和非根际 (B) 土壤微量元素与有机碳、全氮相关性分析

Table 2 Correlation among organic C, total N and micro-nutrients in rhizosphere soil of different vegetations

	Organic C	Total N	pH	Mn	Cu	Fe	Zn
A	Organic C	1	0.981**	-0.613**	0.928**	-0.104	0.633**
	Total N	1	-0.657**	0.959**	-0.085	0.613*	0.651**
	pH		1	-0.623**	-0.178	-0.461	-0.516*
	Mn			1	-0.101	0.482*	0.678**
	Cu				1	-0.009	0.242
	Fe					1	0.074
	Zn						1
B	Organic C	1	0.963**	-0.243	0.888**	0.542*	0.776**
	Total N	1	-0.172	0.883**	0.624**	0.146	0.722**
	pH		1	-0.048	-0.491*	0.133	-0.326
	Mn			1	0.587*	0.078	0.867**
	Cu				1	-0.097	0.632**
	Fe					1	0.187
	Zn						1

* $P < 0.05$; ** $P < 0.01$.

3 讨论

3.1 不同植被根际土壤有机碳、全氮含量及 pH 值

李国辉等^[17]和詹媛媛等^[18]研究表明,植物根际土壤有机碳、全氮含量显著高于非根际.本研究在

柠条、阿尔泰狗娃花和茵陈蒿中发现了相同的现象.这是因为根际土壤中的根系纵横交错,而根系分泌物和根组织的脱落物是土壤 C、N 的重要来源,根际土壤庞大的根系增加了土壤有机碳、全氮的含量,进而表现出强烈的根际富集作用.6 种植物中,除了柠

条和沙棘外,其余 4 种植物根际土壤均表现出不同程度的酸化.这是由于根系呼吸作用释放 CO_2 ,以及在离子主动吸收和根尖细胞伸长过程中分泌质子和有机酸所致,也与植物根际微生物的呼吸作用有关.柠条和沙棘的根际 pH 值大于非根际,可能是它本身对根际阴阳离子选择吸收的结果.

3.2 不同植被根际土壤有效 Mn、Cu、Fe 和 Zn 含量

总体上 6 种植物根际土壤有效 Mn 含量均小于非根际,主要与黄土高原特殊的气候及土壤有关.植被生长过程中需要从根际吸收足够的有效态 Mn 来满足生长的需求,而在干旱地区的碱性土壤中,可供利用的 Mn 比较少,造成根际有效 Mn 含量下降.沙棘、茵陈蒿和阿尔泰狗娃花的有效 Cu 未呈明显的根际富集现象,是由于 Cu 过量会对植物产生毒害作用.在长期的适应过程中,植物会通过螯合、络合、沉淀等作用来降低根际土壤中重金属元素的有效性^[3],减少对 Cu 的吸收利用,从而保证植被的健康生长.因此,植物生长过程中未表现出有效铜根际富集效应是一种积极的环境适应方式.但是在黄土高原干旱条件下,不同植被对环境胁迫的适应方式不同,引起了根际有效 Cu 含量的差异.此外, Lexmond 等^[19]和 Chaignon 等^[20]研究表明,根际 pH 升高会促进根际有效 Cu 含量的增加.因此,柠条有效 Cu 明显的根际富集效应与其较低的根际 pH 值有关.除沙打旺外,其他 5 种植物根际有效 Fe 含量略高于非根际,表现出一定的根际富集效应.除柠条和沙棘外,沙打旺、柳枝稷、茵陈蒿和阿尔泰狗娃花根际有效 Zn 含量均大于非根际.这是植物向根际分泌有机酸和根际微生物作用的结果.植物会尽可能多地活化溶解根际土壤中结合态的 Zn,进而保证自身的吸收利用.由于柠条和沙棘常年对 Zn 的吸收利用,造成了根际含量小于非根际.这需要对植物体内养分转移进行研究来进一步验证.

Zhang 等^[21]认为,与柠条、沙棘、沙打旺及柳枝稷相比,茵陈蒿更能提高黄土区土壤质量.本研究发现,不同植被根际的微量元素含量变化不同.6 种植物中,茵陈蒿根际土壤有效 Cu、Fe、Mn 和 Zn 含量较高,说明茵陈蒿比人工灌木和人工草地更能提高土壤微量元素含量.在植被生长过程中,不同植被对微量元素的根际效应受植物根系的生长特征、根际 pH 值、根际微生物种类、根际分泌物的组成以及所处的发育阶段等因素的影响^[22-26],多种因素的共同作用造成了根际效应的复杂多样性.不同植被根际土壤中微量元素的变化主要是由于根系对离子的选择吸

收和吸收速率的差异引起的.

3.3 不同植被根际土壤有机碳、全氮以及微量元素之间的相关性

魏孝荣和邵明安^[27]研究表明,高的土壤有机质能够显著提高微量元素的有效性. Chen 等^[28]研究发现,红松(*Pinus koraiensis*)对根际有效 Fe、Mn、Cu、Zn 的吸收与施加的氮源浓度紧密相关.本研究结果表明,根际及非根际有机碳、全氮与有效 Mn、有效 Zn 呈极显著正相关,说明土壤有机碳和全氮含量的升高在一定程度上会增加土壤中有效 Mn、Zn 的含量.与非根际相比,根际土壤 pH 值与有效 Mn、有效 Zn 有较好的负相关,是由于 pH 值的降低促进了 Mn、Zn 等微量元素化合物溶解度的增加,从而提高其有效态含量.此外,根际土壤有效 Mn 与有效 Fe、Zn 呈显著正相关,非根际有效 Mn 与有效 Cu、Zn 呈显著正相关,表明在植被生长过程中,土壤微量元素之间相互影响、协同作用,而根际、非根际土壤微量元素之间相关性上的差异与特殊的根际环境有关.黄土丘陵区地处干旱、半干旱气候区,降雨量较少,且年内分配不均,不同植被对不同微量元素吸收的差异较显著.通过对植被根际土壤有效态微量元素的研究,将有助于认识植被的耐旱机理,从而选择出最适合本地区生态恢复的植被.

参考文献

- [1] Zhang X-X (张晓霞), Li Z-B (李占斌), Li P (李鹏). Study on distribution characteristics soil trace elements of grass land in the Loess Plateau. *Journal of Soil and Water Conservation* (水土保持学报), 2010, 24(5): 45-48 (in Chinese)
- [2] Lehto NJ, Davison W, Zhang H, et al. Analysis of micro-nutrient behavior in the rhizosphere using a DGT parameterised dynamic plant uptake model. *Plant and Soil*, 2006, 282: 227-238
- [3] Kopittke PM, Menzies NW. Effect of Mn deficiency and legume inoculation on rhizosphere pH in highly alkaline soils. *Plant and Soil*, 2004, 262: 13-21
- [4] Ren W (任伟), Zhou Z-Y (周志宇), Zhan Y-Y (詹媛媛), et al. The characteristics of medium and trace element concentrations in the rhizosphere of desert shrubs, Alxa. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2009, 29(7): 3759-3767 (in Chinese)
- [5] Zhang W-Y (张文元), Fan S-H (范少辉), Su W-H (苏文会), et al. A dynamic study on trace element of rhizosphere soil during bamboo forming stage of *Phyllostachys edulis*. *Forest Research* (林业科学研究), 2010, 23(4): 586-591 (in Chinese)
- [6] An S-S (安韶山), Zhang Y (张扬), Zheng F-L (郑粉莉). Fractal dimension of the soil aggregate and

- its responds to plant rehabilitation in the hilly-gully region of Loess Plateau. *Science of Soil and Water Conservation* (中国水土保持科学), 2008, **6**(2): 66–70 (in Chinese)
- [7] An S-S (安韶山), Huang Y-M (黄懿梅), Zheng F-L (郑粉莉). Urease activity in the loess hilly grassland soil and its relationship to soil property. *Acta Agrestia Sinica* (草地学报), 2005, **13**(3): 233–237 (in Chinese)
- [8] Jia GM, Cao J, Wang CY, et al. Microbial biomass and nutrients in soil at the different stages of secondary forest succession in Ziuling, northwest China. *Forest Ecology Management*, 2005, **217**: 117–125
- [9] Wen Z-M (温仲明), Jiao F (焦峰), Liu B-Y (刘宝元), et al. Natural vegetation restoration and soil nutrient dynamics of abandoned farm lands in forest steppe zone on Loess Plateau. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2005, **16**(11): 2025–2029 (in Chinese)
- [10] Hu S-J (胡婵娟), Fu B-J (傅伯杰), Jin T-T (靳甜甜), et al. Effects of vegetation restoration on soil microbial biomass carbon and nitrogen in hilly areas of Loess Plateau. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2009, **20**(1): 45–50 (in Chinese)
- [11] Zheng H (郑华), Ouyang Z-Y (欧阳志云), Wang X-K (王效科), et al. Effects of forest restoration patterns on soil microbial communities. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2004, **15**(11): 2019–2024 (in Chinese)
- [12] Jiang JP, Xiong YC, Jiang HM, et al. Soil microbial activity during secondary vegetation succession in semi-arid abandoned lands of Loess Plateau. *Pedosphere*, 2009, **19**: 735–747
- [13] Wang B (王兵), Liu G-B (刘国彬), Xue S (薛薏), et al. Effect of farmland abandonment on soil enzyme activities in Loess Hilly Region. *Acta Agrestia Sinica* (草地学报), 2009, **17**(3): 282–287 (in Chinese)
- [14] Xue S (薛薏), Liu G-B (刘国彬), Dai Q-H (戴全厚), et al. Evolution of soil microbial biomass in the restoration process of artificial *Robinia pseudoacacia* under erosion environment. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2007, **27**(3): 909–917 (in Chinese)
- [15] Chen YM, Wang MK, Zhuang SY, et al. Chemical and physical properties of rhizosphere and bulk soils of three tea plants cultivated in Ultisols. *Geoderma*, 2006, **136**: 378–387
- [16] Institute of Soil Science of Chinese Academy of Sciences (中国科学院南京土壤研究所). Soil Chemical and Physical Analysis. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1978 (in Chinese)
- [17] Li G-H (李国辉), Chen Q-F (陈庆芳), Huang Y-M (黄懿梅), et al. Soil microbial biomass C, N, P and basal respiration in rhizosphere soil of typical plants on the Loess Plateau. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2010, **30**(4): 976–983 (in Chinese)
- [18] Zhan Y-Y (詹媛媛), Xue Z-Y (薛梓瑜), Ren W (任伟), et al. Characteristics of nitrogen content between rhizosphere and bulk soil under seven shrubs in arid desert area of China. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2009, **29**(1): 59–66 (in Chinese)
- [19] Lexmond TM, Vorm PDJ. The effect of pH on copper toxicity to hydroponically grown maize. *Netherlands Journal of Agricultural Science*, 1981, **29**: 217–238
- [20] Chaignon V, Bedin F, Hinsinger P. Copper bioavailability and rhizosphere pH changes as affected by nitrogen supply for tomato and oilseed rape cropped on an acidic and alcalcareous soil. *Plant and Soil*, 2002, **243**: 219–228
- [21] Zhang C, Liu GB, Xue S, et al. Rhizosphere soil microbial activity under different vegetation types on the Loess Plateau, China. *Geoderma*, 2011, **161**: 115–125
- [22] Ji X (纪萱), Chen L-X (陈立新), Xue H-X (薛洪祥). Changing rules of soil nutrients and microelements in Korean pine plantations of different ages. *Journal of Northeast University* (东北林业大学学报), 2007, **35**(7): 27–29 (in Chinese)
- [23] Ji Y-Z (吉艳芝), Feng W-Z (冯万忠), Chen L-X (陈立新), et al. Soil nutrition, microorganisms and enzyme activity of the rhizosphere and non-rhizosphere soils of mixed plantation of *Larix*. *Ecology and Environment* (生态环境), 2008, **17**(1): 339–343 (in Chinese)
- [24] Qi L-H (漆良华), Zhang X-D (张旭东), Peng Z-H (彭镇华), et al. Soil microelements under different vegetation restoration patterns in yellow soil slope region of mid-subtropics. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2008, **19**(4): 735–740 (in Chinese)
- [25] Hinsinger P. Bioavailability of soil inorganic P in the rhizosphere as affected by root induced chemical changes: A review. *Plant and Soil*, 2001, **237**: 173–195
- [26] Yi L-P (弋良朋), Ma J (马健), Li Y (李彦). Soil salt and nutrient concentration in the rhizosphere of desert halophytes. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2007, **27**(9): 3565–3571 (in Chinese)
- [27] Wei X-R (魏孝荣), Shao M-A (邵明安). Distribution of micronutrients in soils as affected by landforms in a loessial gully watershed. *Environmental Science* (环境科学), 2009, **30**(9): 2741–2746 (in Chinese)
- [28] Chen YL, Han SJ, Zhou YM, et al. The rhizosphere pH change of *Pinus koraiensis* seedlings as affected by N sources of different levels and its effect on the availability and uptake of Fe, Mn, Cu and Zn. *Journal of Forestry Research*, 2001, **12**: 247–249

作者简介 张超,男,1985年生,博士研究生.主要从事于恢复生态与微生物生态研究. E-mail: zhangchaolynn@163.com.

责任编辑 李凤琴